中国生态农业学报 2016 年 8 月 第 24 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2016, 24(8): 1071−1079

ChinaXiv合作期刊

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160079

# 造墒与播后镇压对小麦冬前耗水和生长发育的影响*

党红凯[1] 曹彩云[1] 郑春莲[1] 马俊永[1] 郭 丽[1] 王亚楠[2] 李 伟[1] 李科江[1**]

(1. 河北省农林科学院旱作农业研究所/河北省农作物抗旱性研究重点实验室 衡水 053000;
2. 河北省农业技术推广总站 石家庄 050011)

**摘 要** 为明确造墒和播后镇压对小麦冬前耗水和群体与个体特征及产量的影响，为确定播后镇压技术和提高小麦水分利用效率提供依据，分别于 2013—2014 年和 2014—2015 年小麦生长季在河北省衡水市选用当地小麦品种'衡 4399'，分 9 月 15 日(I9.15)、9 月 20 日(I9.20)、9 月 25 日(I9.25)和 9 月 30 日(I9.30)4 期造墒，以不造墒为对照(CK)，每期处理又设每延米 0 kg(G0)、95 kg(G95)和 120 kg(G120) 3 个水平镇压的冬小麦田间试验。冬前对土壤水分和小麦幼苗生长情况进行动态监测，翌年成熟期考察产量性状并测产。结果表明，播种时土壤水分含量高，冬前阶段农田蒸散量也高。同一造墒不同镇压处理比较，I9.30 处理以 G95 田间蒸散量最低，其他处理均以 G120 蒸散量最低，处理间差异显著。对苗情的影响，同一造墒不同镇压比较，苗期单株生物量、叶面积、群体总茎数以 G120 与 G95 处理较高，以 G0 处理较低，处理间显著水平不同；同一镇压不同造墒处理间比较，不造墒的 CK 总茎数显著减少，产量显著较低，且年际变化不稳定。造墒与镇压对穗数影响较大，其中造墒处理穗数显著高于 CK，镇压处理对穗数的影响表现一致：G120>G95>G0。以上处理对产量与对穗数的影响一致：造墒处理间产量差异水平不同，但以 CK 最低；镇压处理间产量差异不显著，但以 G0 最低。造墒和镇压对产量的交互作用不显著。综上可见，墒情适宜是小麦播后镇压的基础，镇压又是提墒壮苗的保障。河北地区小麦造墒水提前到 9 月 20—25 日，播种后采用 95 $kg \cdot m^{-1}$ 镇压器便于田间操作且镇压效果较好。

**关键词** 冬小麦 造墒 播后镇压 蒸散量 土壤水分 产量
**中图分类号:** S512.1+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)08-1071-09

# Effects of pre-sowing irrigation and post-sowing soil compaction on water use and growth of winter wheat*

DANG Hongkai[1], CAO Caiyun[1], ZHENG Chunlian[1], MA Junyong[1], GUO Li[1], WANG Yanan[2], LI Wei[1], LI Kejiang[1**]

(1. Institute of Dryland Farming, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences / Laboratory of Crop Drought Resistance of Hebei Province, Hengshui 053000, China; 2. General Station for Agricultural Technology Extension, Shijiazhuang 050011, China)

**Abstract** In order to clarify the effect of pre-sowing irrigation and post-sowing soil compaction on water use, growth and yield of winter wheat, a field experiment was conducted in Hengshui City in 2013–2014 and 2014–2015. The experiment included 4 treatments of pre-sowing irrigation of winter wheat — irrigation dates of Sep. 15 (I9.15), Sep. 20 (I9.20), Sep. 25 (I9.25) and Sep. 30 (I9.30) and no irrigation as control (CK) treatment. Each treatment consisted of 3 levels of soil compaction intensity after sowing per meter— 120 kg (G120), 95 kg (G95) and 0 kg (G0). The 'Heng 4399' winter wheat variety was used in the field experiment and the soil moisture content, growth and grain yield monitored during the wheat growth period. The results of the study showed that

* 国家科技支撑计划项目(2013BAD05B05)、公益性行业(农业)科研专项(201203077, 201303133)、河北省小麦产业体系和河北省自然基金项目(C2014301026)资助
** 通讯作者: 李科江，主要从事节水农业研究。E-mail: nkylkj@126.com
党红凯，主要从事作物高产栽培生理研究。E-mail: wheatcrop@126.com
收稿日期: 2016−01−19 接受日期: 2016−04−25

* This study was supported by the National Key Technology R&D Program of China (2013BAD05B05), the Special Fund for Agro-Scientific Research in the Public Interest (201203077, 201303133), Hebei Province Wheat Industry System and Hebei Province Science Foundation (C2014301026).
** Corresponding author, E-mail: nkylkj@126.com
Received Jan. 19, 2016; accepted Apr. 25, 2016



chinaXiv:201711.01161v1

ChinaXiv合作期刊

evapotranspiration of wheat before winter wheat overwinter time was positively associated with soil moisture at sowing time. There were significant differences in evapotranspiration among different soil compaction treatments under the same irrigation date. Comparison among different irrigation dates showed that early irrigation lowered soil moisture and evapotranspiration at wheat sowing stage, which was the reverse for late irrigation treatments. The minimum evapotranspiration was observed in G95 treatment under I9.30 irrigation date, while it was observed in G120 treatment under others irrigation dates. For different soil compaction treatments under the same irrigation date treatment, the order of the number of spikes was G120 > G95 > G0. Biomass accumulation, leaf area, stem number and grain yield were lowest in G0 treatment, while were higher under both G120 and G95 conditions. Stem number, spikes number and grain yield were lowest in CK treatment. Although irrigation time significantly influenced spike number, no significant interaction was noted between soil compaction and pre-sowing irrigation. The results demonstrated that the most suitable soil moisture for seed germination depended on the degree of soil compaction. Thus it was possible to use soil compaction to regulate soil moisture and invigorate seedling. The study suggested that the best period for early irrigation was from Sep. 20th to Sep. 25th. The most appropriate weight of roller was about 95 kg per meter.
**Keywords** Winter wheat; Pre-sowing irrigation; Post-sowing soil compaction; Evapotranspiration; Soil moisture; Grain yield

chinaXiv:201711.01161v1

小麦是我国仅次于水稻、玉米的第三大粮食作物，是河北省的基本口粮作物。小麦适应性强，可在华北气温较低的秋冬季节生长[1]，增加该地区复种指数，提高周年粮食产量[2]。小麦也是北方地区秋冬季节覆盖地面的重要绿色植物，提高小麦冬前苗质量，保证叶片带绿越冬，不仅为丰产打下基础，同时也改善京津冀地区的生态环境[3]。可见，冬前壮苗对小麦生产和环境改良都具有重要的意义。河北平原小麦生育期平均降雨量为 109 mm，而小麦需水量为 420 mm，河北平原自然降水不能满足小麦生长对水分的需求[4−5]。由于无地表水供给，深层地下水是补给麦田水分的主要水源[6]。长期超采地下水，带来了严重的生态问题。减小土壤水分的无效蒸发和提高水分生产效率是当前小麦生产亟待解决的问题[7]。

由于受季风性气候影响，河北平原进入 9 月份降雨明显减少，降雨难以满足小麦出苗对水分的需求。考虑到小麦玉米一体化种植，可在玉米乳熟后期为小麦提前造墒[8]，但该灌溉技术对小麦的影响鲜见报道。另外河北平原小麦出苗 1 个月后陆续进入越冬期，与河南山东相比，该区麦田冬季寒冷少雪，极易遭遇冻害，增温保墒对小麦安全越冬很重要[1,9]。小麦播后镇压有踏实土壤、压碎土块、平整地面的作用，起到稳定地温、保水提墒的作用[1]。镇压通过增加耕层土壤紧密度而提高土壤含水量，使种子与土壤紧密接触，利于根系喷发和下扎[1]。但土壤紧实度过大或过小都不利于小麦出苗。镇压后土壤过度紧实，非但起不到促苗壮苗作用，反而会造成土壤板结、致使苗情偏弱[10]。可见，通过适度镇压及与玉米倒茬时适期灌水，对提高小麦苗质量具有重要意义。为此，本研究通过不同时期造墒形成的不同墒情麦田和播后不同镇压重力构建的小麦群体，研究不同条件下麦田冬前耗水特征及小麦群体、个体特征和产量性状，为确定小麦播后镇压技术和提高水分利用效率提供研究依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 基本情况

田间试验于 2013—2014 年和 2014—2015 年连续 2 个小麦生长季在河北省农林科学院旱作节水农业试验站进行。该站位于河北平原中南部，属于黑龙港小麦生长区，具有中国北方半干旱农业生产区的典型特征。该区常年采用冬小麦夏玉米一年两熟种植制。年均日照时数、无霜期、蒸发量、降水量、气温分别为 2 509.4 h、188 d、1 785 mm、510 mm、12.8 ℃[11]。试验田土质为壤土，0~200 cm 平均土壤容重 1.40 $g\cdot cm^{-3}$; 0~20 cm 耕层土壤肥力为：有机质含量 14.39 $g\cdot kg^{-1}$，全氮含量 1.48 $g\cdot kg^{-1}$，速效氮含量 101.36 $mg\cdot kg^{-1}$，速效磷含量 21.95 $mg\cdot kg^{-1}$，速效钾含量 113.68 $mg\cdot kg^{-1}$。小麦生长季降雨量见表 1。

表 1 试验年度小麦生育期内降雨量
Table 1 Precipitation during growing period of wheat in the test years mm

| 年度 Year | 月份 Month | | | | | | | | | 全生育期 Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 2013—2014 | 4.4 | 8.7 | 0.3 | 0.5 | 5.1 | 0.7 | 49.6 | 35.7 | 26.1 | 131.0 |
| 2014—2015 | 0.5 | 15.6 | 0 | 0 | 0 | 11.1 | 56.9 | 58.2 | 1.2 | 143.5 |

### 1.2 试验设计

选用大面积种植且具节水高产潜力的冬小麦品种衡‘4399’为试验材料，按照常规播种量(225 $kg\cdot hm^{-2}$)统一播种。主处理为小麦造墒时期处理，设 9 月 15 日

ChinaXiv合作期刊

(I9.15)、9 月 20 日(I9.20)、9 月 25 日(I9.25)、9 月 30 日(I9.30)灌水造墒和不灌水(CK)5 个水平。灌水量 45 mm，每个处理占地 666.7 $mm^2$，顺序排列。主处理下设镇压重力副处理。镇压机具采用 SL200 型小麦镇压器，长、宽、高分别为 2.00 m、0.45 m 和 0.40 m，机体重量 190 kg，镇压轮直径 0.35 m。通过在镇压器机架上配重土壤调节镇压强度。以生产上普遍采用的 190 kg(G95)镇压为对照，增设不镇压(G0)和 240 kg 加重镇压(G120)，共 3 个水平。

冬小麦夏玉米收获后秸秆全量粉碎还田。整地前底施二铵 525 kg·$hm^{-2}$，氯化钾 150 kg·$hm^{-2}$。拔节期追施尿素 375 kg·$hm^{-2}$。折合施用化肥量为 N 267 kg·$hm^{-2}$，$P_2O_5$ 241.5 kg·$hm^{-2}$，$K_2O$ 90 kg·$hm^{-2}$。播后安排镇压试验。其他管理同常规大田。2013—2014 年度，10 月 14 日播种，10 月 16 日镇压，翌年 5 月 10 日扬花，6 月 9 日收获；2014—2015 年度，2014 年 10 月 12 日播种，10 月 14 日镇压，翌年 5 月 8 日扬花，6 月 11 日收获。

### 1.3　田间调查

#### 1.3.1　表层土壤硬度

镇压后在每个处理区，利用土壤硬度仪(上海)测定表层土硬度，每区测定重复 30 次，取其平均值。

#### 1.3.2　总茎数调查

在每个副处理定 3 个点，从 11 月 2 日开始，每隔 5 d 数苗一次。按 1 m 双行折算总茎数，取各点的平均数折算处理的总茎数。

#### 1.3.3　植株性状

在每个处理多点取苗 30 株，作为考察样本。逐株考察株高、单株茎数、叶面积和次生根数。考察单株性状后，去掉根部，置烘箱 105 ℃杀青，80 ℃烘干至恒重，冷却后称重，计算单株干重。

### 1.4　土壤含水量的测定及农田蒸散量和水分利用率的计算

播种前(2013 年 10 月 12 日，2014 年 10 月 10 日)在各造墒水试验区，用土钻钻取 0~200 cm 土层；越冬前(2013 年 12 月 2 日，2014 年 12 月 3 日)在各处理小区，用土钻钻取 0~100 cm 土层土样，每 10 cm 为一层。每个处理取土 3 次重复。采用烘干法测定土壤含水量，用于计算蒸散量。由于冬前小麦根系浅，水分消耗主要考虑 0~100 cm 土层，公式如下[12]:

$$ET_{1-2}=10\sum_{i=1}^{n}\gamma_i H_i\left(\theta_{i1}-\theta_{i2}\right)+M+P_0+K \qquad (1)$$

式中：$ET_{1-2}$ 为阶段蒸散量；$i$ 为土层编号；$n$ 为总土层数；$\gamma_i$ 为第 $i$ 层土壤干容重；$H_i$ 为第 $i$ 层土壤厚度；$\theta_{i1}$ 和 $\theta_{i2}$ 为第 $i$ 层土壤时段初和时段末的含水率，以占干土重的百分数计算；$M$ 为时段内的灌水量；$P_0$ 为有效降雨量；$K$ 为时段内的地下水补给量，当地下水埋深大于 2.5 m 时，$K$ 值可以不计，本试验的地下水埋深在 10 m 以下，因此无地下水补给。

耗水来源比例(%)=耗水构成/蒸散量×100%　(2)

### 1.5　产量和产量构成因素测定

成熟前在田间计数各样点上的穗数，计算出穗数。然后在样点中随机抓取 20 穗，调查穗粒数。在同一块地上多点取样 30 株左右，带回室内。逐株考察植株性状。每区收获 2 $m^2$ 的样点 3 个，折算每 $hm^2$ 产量。从各样点晒干的籽粒中随机抽取，计数千粒重。

### 1.6　数据处理

采用 Microsoft Excel 和 DPS 软件进行数据处理和统计分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同造墒和镇压处理对土壤性状的影响

#### 2.1.1　对表层土壤硬度的影响

土壤硬度大，土壤紧实度也高。同一造墒处理，随着镇压重力的增加，表层土壤硬度也提高，部分处理间差异达到显著水平(见表 2)。年际间处理间变化基本一致，2013 年以 I9.20 造墒处理下 G120 处理

**表 2　2013 年和 2014 年不同造墒时期和不同镇压处理对土壤硬度的影响**

Table 2　Soil hardness under post-sowing soil compaction treatments with different times of pre-sowing irrigation in 2013 and 2014

kg·$cm^{-2}$

| 造墒时间 Irrigation time | 镇压处理 Compaction treatment | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2013 年 Year 2013 | | | 2014 年 Year 2014 | | |
| | G0 | G95 | G120 | G0 | G95 | G120 |
| CK | 0.90±0.13c | 2.40±0.20b | 5.40±0.51a | 0.15±0.02c | 0.60±0.07b | 1.05±0.15a |
| I9.15 | 1.40±0.15c | 3.20±0.22b | 6.25±0.31a | 1.00±0.15c | 3.20±0.18b | 6.20±0.42a |
| I9.20 | 1.66±0.15c | 3.80±0.30b | 9.20±0.82a | 1.14±0.13c | 7.20±0.66b | 9.80±0.53a |
| I9.25 | 1.75±0.20c | 4.70±0.39b | 8.20±0.74a | 1.44±0.15c | 5.20±0.41b | 11.40±0.33a |
| I9.30 | 2.20±0.20c | 4.40±0.39b | 5.60±0.46a | 1.02±0.17c | 4.20±0.36b | 10.20±0.79a |

造墒时间处理 CK 和 I9.15、I9.20、I9.25、I9.30 分别表示不灌水和播前灌水造墒时间为 9 月 15 日、9 月 20 日、9 月 25 日、9 月 30 日. G0、镇压处理 G95 和 G120 分别为表示镇压强度为 0 kg、95 kg 和 120 kg。数字后不同小写字母表示同一造墒时间不同镇压处理间差异显著。下同。CK, I9.15, I9.20, I9.25 and I9.30 are irrigation time treatments of no irrigation, irrigation at 15th, 20th, 25th and 30th September, respectively. G0, G95 and G120 are compaction treatments with compaction intensities of 0 kg, 95 kg and 120, respectively. Different lowercase letters following the data show significant difference among the three compaction treatments under the same pre-sowing irrigation treatment at 0.05 level. The same below.



chinaXiv:201711.01161v1

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:201711.01161v1

最大，达到 9.20 kg·cm$^{-2}$；2014 年则以 I9.25 造墒处理下 G120 处理最大，达到 11.40 kg·cm$^{-2}$。同镇压重力不同造墒水处理间比较，以 I9.20、I9.25 处理土壤硬度最高或较高，以不灌水的对照(CK)最低。

**2.1.2** 不同时期造墒处理对底墒的影响

2 年不同造墒处理 0~100 cm 土层土壤含水量变化基本一致，CK 处理 0~80 cm 土壤墒情明显低于不同时期灌水的处理。年际间比较，以 2014 年差异更为明显(见图 1)。不同处理间比较，0~100 cm 土层土壤水分含量，2 年变化基本一致：I9.30>I9.25≥I9.20>I9.15>CK。总体来看，灌水越晚，0~100 cm 土层土壤含水量越高。

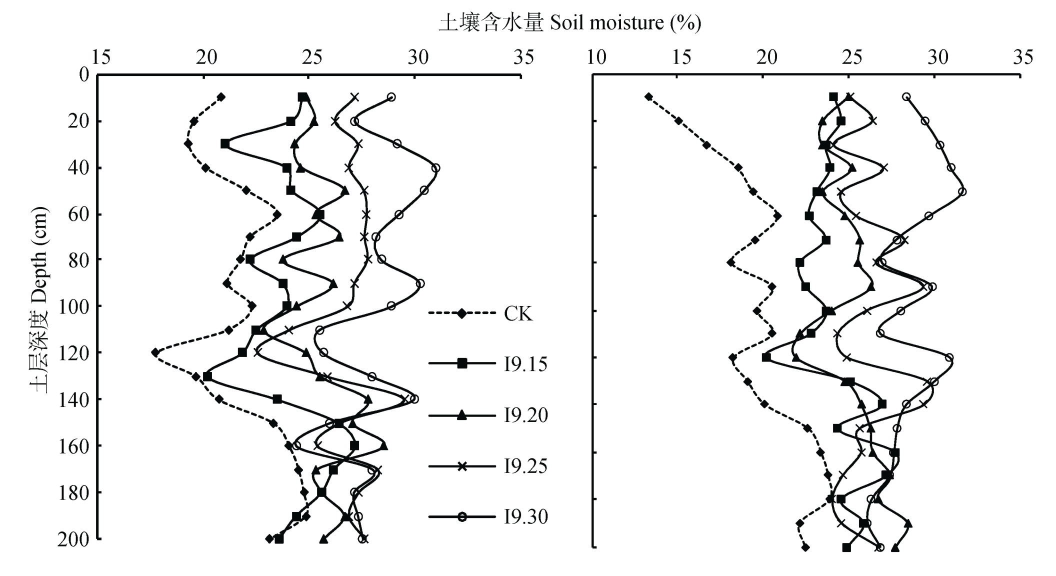



**图 1 2013 年(a)和 2014 年(b)不同造墒时期处理下小麦播前 0~200 cm 土层土壤含水量**

Fig. 1 Water contents of different layers of 0–200 cm soil with different times of pre-sowing irrigation in 2013 (a) and 2014 (b)

100~200 cm 处理间土壤含水量变化与 0~100 cm 相似，但处理间差异较小，土壤水分含量变幅 17.28%~30.92%。年际间比较，以 2014 年 CK 处理最低，与 2014 年玉米季降雨较少，玉米消耗深层土壤水分后没有得到有效补给有关。

**2.1.3** 冬前土壤耗水特征

本研究条件下，小麦播种–越冬前农田蒸散量为 19.78~51.76 mm。同一底墒处理，I9.30 处理以 G95 镇压蒸散量最低，其他处理均以 G120 蒸散量最低。土壤供水量所占蒸散量的比例为 18.64%~73.01%，随着镇压重力的增加土壤供水量所占蒸散量的比例有减小趋势；降雨量所占农田蒸散量的比例随着镇压重力的增加有增加的趋势。同一底墒处理，年际间有一定差异：2013 年以灌水处理较早的 I9.15 和不灌水的 CK 处理农田蒸散量与土壤供水量较大；2014 年以灌水处理较晚的 I9.25 和 I9.30 处理农田蒸散量与土壤供水量较大。

同一镇压强度不同灌水处理间比较，随造墒时间的推迟，土壤供水量与农田蒸散量有增加的趋势。土壤供水量所占农田蒸散量的比例随着造墒的推迟有所增加；降雨所占农田蒸散量的比例随着造墒的推迟有所减小。年际间比较，随镇压强度的变化，农田蒸散量与土壤供水量差异不具规律性。

**2.2** 不同造墒和镇压处理对小麦冬前群个体影响

**2.2.1** 对小麦冬前苗情影响

分别于 2013 年和 2014 年的 11 月 11 日对麦田苗情进行调查，结果见表 4。同一造墒处理不同镇压重力比较，以 G120 与 G95 处理单株生物量较高，以 G0 处理单株生物量最低。同一镇压重力造墒处理间比较，随灌水时间的推迟，单株生物量有增加的趋势，表现为 I9.30≥I9.25≥I9.20≥I9.15>CK，年际间差异较小。不同处理对次生根的影响与对生物量的影响相似，但不尽相同，G95 处理次生根条数以 I9.25 或 I9.20 最高，I9.30 较低。不同处理对单株叶面积的影响与对次生根的影响基本相似。总体来看，G95 镇压处理+I9.20 与 I9.25 造墒处理，小麦冬前苗质量普遍较好。

**2.2.2** 小麦冬前群体动态变化

由表 5 可见，冬前阶段随时间推迟总茎数逐渐增加，处理间增加趋势因造墒水与播后镇压不同而有所差异。2 年中 5 个造墒水平之间的差异显著性不同，2013 年以 I9.25 处理总茎数最高，2014 年以 I9.30 处理总茎数最高，均以 CK 处理最低，差异达到显著水平。2 年中 3 个镇压水平之间的差异显著性相近。以 G120 或 G95 总茎数较高，均以 CK 处理最低。

ChinaXiv合作期刊

表 3 2013 年和 2014 年不同造墒时期和不同镇压处理对冬前小麦耗水的来源及其比例的影响

Table 3 Effects of different post-sowing soil compaction treatments and different times of pre-sowing irrigation on the ratios of different water resource of water consumption in 2013 and 2014

| 造墒时间 Irrigation time | 镇压处理 Compaction treatment | 蒸散量 Evapotranspiration (mm) | | 降水量 Precipitation | | | | 土壤供水 Soil water supply | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 2013 年 Year 2013 | | 2014 年 Year 2014 | | 2013 年 Year 2013 | | 2014 年 Year 2014 | |
| | | 2013 年 Year 2013 | 2014 年 Year 2014 | 数量 Amount (mm) | 比例 Ratio (%) | 数量 Amount (mm) | 比例 Ratio (%) | 数量 Amount (mm) | 比例 Ratio (%) | 数量 Amount (mm) | 比例 Ratio (%) |
| CK | G120 | 22.41±0.71b | 19.78±0.08b | 13.6 | 60.69±1.92a | 16.1 | 81.40±0.33a | 8.81±0.71b | 39.31±1.92a | 3.68±0.08b | 18.60±0.33b |
| | G95 | 26.88±0.64a | 22.80±0.63a | 13.6 | 50.60±1.21b | 16.1 | 70.61±1.95b | 13.28±0.64ab | 49.40±1.21a | 6.70±0.63a | 29.39±1.95a |
| | G0 | 29.59±0.83a | 25.88±0.49a | 13.6 | 45.96±1.29b | 16.1 | 62.21±1.18c | 15.99±0.83a | 54.04±1.29a | 9.78±0.49a | 37.79±1.18a |
| I9.15 | G120 | 40.15±0.93b | 32.75±1.24a | 13.6 | 33.87±0.79a | 16.1 | 49.16±1.86a | 26.55±0.93b | 66.13±0.79a | 16.65±1.24a | 50.84±1.86a |
| | G95 | 47.59±0.66a | 34.07±0.43a | 13.6 | 28.58±0.40ab | 16.1 | 47.26±0.59a | 33.99±0.66a | 71.42±0.40a | 17.97±0.43a | 52.74±0.59a |
| | G0 | 49.57±0.84a | 32.88±0.19a | 13.6 | 27.44±0.47b | 16.1 | 48.97±0.28a | 35.97±0.84a | 72.56±0.47a | 16.78±0.19a | 51.03±0.28a |
| I9.20 | G120 | 37.97±0.46a | 39.89±0.01b | 13.6 | 35.82±0.43a | 16.1 | 40.36±0.01a | 24.37±0.46b | 64.18±0.43a | 23.79±0.01b | 59.64±0.01b |
| | G95 | 41.31±0.28a | 41.88±0.46b | 13.6 | 32.92±0.22a | 16.1 | 38.44±0.42a | 27.71±0.28ab | 67.08±0.22a | 25.78±0.46ab | 61.56±0.42ab |
| | G0 | 43.85±0.72a | 46.75±0.38a | 13.6 | 31.01±0.51a | 16.1 | 34.44±0.27b | 30.25±0.72a | 68.99±0.51a | 30.65±0.38a | 65.56±0.27a |
| I9.25 | G120 | 35.24±0.83b | 42.05±0.27b | 13.6 | 38.59±0.91a | 16.1 | 38.29±0.25a | 21.64±0.83b | 61.41±0.91ab | 25.95±0.27b | 61.71±0.25a |
| | G95 | 33.92±0.14b | 45.95±1.24b | 13.6 | 40.09±0.17a | 16.1 | 35.04±0.95a | 20.32±0.14b | 59.91±0.17b | 29.85±1.24a | 64.96±0.95a |
| | G0 | 40.36±1.02a | 46.60±1.03b | 13.6 | 33.70±0.85b | 16.1 | 34.55±0.76a | 26.76±1.02a | 66.30±0.85a | 30.50±1.03a | 65.45±0.76a |
| I9.30 | G120 | 45.59±0.88b | 50.69±0.58a | 13.6 | 29.83±0.58ab | 16.1 | 31.76±0.36a | 31.99±0.88b | 70.17±0.58a | 34.59±0.58a | 68.24±0.36a |
| | G95 | 43.57±0.43b | 47.86±0.39a | 13.6 | 31.21±0.31a | 16.1 | 33.64±0.27a | 29.97±0.43b | 68.79±0.31a | 31.76±0.39a | 66.36±0.27a |
| | G0 | 50.38±0.79a | 51.76±0.64a | 13.6 | 26.99±0.42b | 16.1 | 31.11±0.38a | 36.78±0.79a | 73.01±0.42a | 35.66±0.64a | 68.89±0.38a |

表 4 不同造墒时期和不同镇压处理对冬前小麦幼苗质量影响

Table 4 Effects of different post-sowing soil compaction treatments and different times of pre-sowing irrigation on the seedling quality of winter wheat

| 指标 Index | 年份 Year | 镇压处理 Compaction treatment | 造墒时期 Irrigation time | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | CK | I9.15 | I9.20 | I9.25 | I9.30 |
| 单株生物量 Biomass per plant (g) | 2013 | G120 | 0.073±0.009a | 0.077±0.007a | 0.079±0.006a | 0.082±0.006a | 0.095±0.009a |
| | | G95 | 0.062±0.007a | 0.071±0.006a | 0.072±0.005a | 0.073±0.003ab | 0.080±0.005b |
| | | G0 | 0.060±0.007a | 0.062±0.005a | 0.062±0.004b | 0.067±0.005b | 0.071±0.008c |
| | 2014 | G120 | 0.061±0.006a | 0.076±0.005a | 0.077±0.003a | 0.079±0.005a | 0.103±0.008a |
| | | G95 | 0.058±0.005a | 0.068±0.004ab | 0.063±0.005b | 0.070±0.001a | 0.110±0.010a |
| | | G0 | 0.052±0.006a | 0.054±0.005b | 0.066±0.006ab | 0.072±0.006a | 0.069±0.007b |
| 单株次生根数 Secondary root number per plant | 2013 | G120 | 3.90±0.41a | 4.05±0.38a | 4.40±0.26a | 4.60±0.39a | 4.30±0.41a |
| | | G95 | 4.00±0.39a | 4.25±0.35a | 4.45±0.43a | 4.65±0.38a | 4.30±0.37a |
| | | G0 | 3.50±0.40b | 3.55±0.36b | 3.80±0.29b | 3.95±0.38b | 4.25±0.40a |
| | 2014 | G120 | 3.85±0.38a | 4.15±0.39a | 4.15±0.27ab | 4.22±0.33a | 4.24±0.40a |
| | | G95 | 3.65±0.33a | 4.20±0.32a | 4.45±0.30a | 4.14±0.37a | 4.35±0.39a |
| | | G0 | 3.55±0.36a | 3.65±0.37b | 3.91±0.38b | 4.00±0.40a | 3.95±0.40a |
| 单株叶面积 Leaf area per plant ($cm^2$) | 2013 | G120 | 2.94±0.30ab | 3.83±0.33a | 3.84±0.34ab | 3.91±0.28a | 4.32±0.39a |
| | | G95 | 3.12±0.30a | 3.54±0.35a | 4.12±0.37a | 4.13±0.30a | 3.51±0.30b |
| | | G0 | 2.52±0.24b | 2.82±0.25b | 3.42±0.34b | 3.31±0.34b | 3.20±0.33b |
| | 2014 | G120 | 2.84±0.27a | 3.62±0.06a | 3.71±0.25a | 3.83±0.33ab | 4.32±0.34a |
| | | G95 | 3.08±0.27a | 3.51±0.29a | 3.72±0.30a | 4.53±0.41a | 4.74±0.49a |
| | | G0 | 2.64±0.28a | 2.83±0.28b | 2.96±0.27b | 2.93±0.30b | 3.25±0.33b |

chinaXiv:201711.01161v1

ChinaXiv合作期刊

表 5 不同造墒时期和不同镇压处理对冬前不同时期小麦群体总茎数的主效应与方差分析

Table 5 Main effects and *F* values of different post-sowing soil compaction treatments and different times of pre-sowing irrigation on stem number of winter wheat at pre-winter stage

| 年份 Year | 分析 Analysis | 因素 Factor | 处理 Treatment | 日期(月-日) Date (month-day) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 11-02 | 11-07 | 11-12 | 11-17 | 11-22 | 11-27 |
| 2013 | 主效应 Main effect | 造墒时期 Irrigation time | CK | 235.3±32.6c | 257.5±23.8c | 288.2±27.6c | 296.3±28.6c | 326.8±33.1c | 330.2±30.5c |
| | | | I9.15 | 380.0±30.6b | 392.3±30.7b | 401.7±28.6b | 413.5±33.2b | 433.5±35.3b | 441.0±36.4b |
| | | | I9.20 | 400.1±30.2ab | 425.3±33.8ab | 435.3±34.1a | 445.6±38.2a | 462.7±40.3a | 466.0±40.7ab |
| | | | I9.25 | 432.1±28.3a | 459.6±30.5a | 458.7±30.8a | 469.5±31.5a | 475.3±32.4a | 481.6±35.2a |
| | | | I9.30 | 400.7±39.4ab | 413.5±40.3b | 422.2±41.2ab | 441.3±41.3a | 442.5±42.1ab | 459.2±42.8ab |
| | | | G0 | 354.3±56.8b | 369.2±50.3b | 383.3±40.1b | 396.6±42.3b | 407.2±51.4b | 415.1±52.7b |
| | | | G95 | 373.3±41.4ab | 399.7±45.2a | 414.4±38.4a | 420.4±40.5a | 439.3±42.3a | 445.9±45.2a |
| | | | G120 | 381.3±45.4a | 399.3±41.7a | 405.9±41.1ab | 422.7±41.7a | 438.0±44.8a | 445.8±43.3a |
| | | 方差分析 *F* values | I | 166.84* | 250.42* | 151.77* | 167.49* | 99.38* | 87.24* |
| | | | G | 24.76* | 103.33* | 75.42* | 103.01* | 24.07* | 33.68* |
| | | | I × G | 25.53* | 204.02* | 93.37* | 102.97* | 33.44* | 55.74* |
| 2014 | 主效应 Main effect | 造墒时期 Irrigation time | CK | 90.5±9.4c | 123.0±11.5c | 137.5±14.8c | 144.0±17.6c | 165.5±18.3c | 185.5±19.6c |
| | | | I9.15 | 371.4±36.5ab | 389.8±32.7a | 397.3±38.5ab | 401.3±39.6ab | 410.3±33.1b | 413.8±32.1b |
| | | | I9.20 | 356.0±30.4b | 365.5±31.5b | 376.5±32.1b | 385.5±33.8b | 395.5±38.7b | 403.5±37.6b |
| | | | I9.25 | 360.0±27.6b | 370.0±28.3b | 377.8±28.7b | 387.5±30.3b | 393.0±33.2b | 415.5±33.8b |
| | | | I9.30 | 399.3±36.9a | 413.5±38.7a | 422.2±39.2a | 441.3±40.2a | 442.5±38.7a | 459.2±36.5a |
| | | 镇压 Compaction | G0 | 305.9±41.2b | 319.2±41.3b | 335.2±50.5a | 344.0±49.2a | 353.1±57.2a | 359.8±51.8b |
| | | | G95 | 308.9±33.5b | 331.5±37.8ab | 338.0±31.8a | 345.8±30.5a | 354.8±30.1a | 375.5±30.5ab |
| | | | G120 | 331.5±30.4a | 346.8±31.2a | 353.6±34.4a | 366.0±33.1a | 376.2±32.6a | 391.2±32.4a |
| | | 方差分析 *F* values | I | 83.67* | 83.44* | 60.54* | 83.92* | 81.29* | 90.24* |
| | | | G | 35.42* | 15.27* | 23.08* | 3.64* | 13.01* | 35.13* |
| | | | I × G | 23.17* | 34.01* | 12.94* | 2.71* | 24.04* | 23.14* |

同年度同因素处理的数据后不同小写字母表示不同处理间差异达 0.05 显著水平，*表示差异达 0.05 显著水平。下同。Different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level, respectively. * means significant difference at 0.05 level. The same below.

chinaXiv:201711.01161v1

两个年度冬前不同时期小麦群体的方差分析表明(表 5)，造墒对群体的影响达到显著水平。造墒和镇压对冬前群体的交互作用也达到显著水平。

**2.3 不同造墒和镇压处理对产量构成的影响**

对不同造墒和镇压的主效应进行多重比较(见表 6)，发现同一年份不同造墒处理对穗数影响差异显著，CK 处理穗数显著低于其他造墒处理，造墒处理间也有一定的差异，年际间比较，以 I9.25 处理成穗数较高，也比较稳定。不同镇压重力对穗数的影响年际间处理间表现一致：G120>G95>G0，且 G120 与 G0 差异达到显著水平。造墒处理与播后镇压对穗粒数的影响较小，只有 2014—2015 年 G120 与 G0 差异显著，其他处理差异均不显著。镇压对千粒重的影响较小，差异没有达到显著水平；造墒处理间千粒重差异显著，但处理间不具规律性。

不同造墒处理间比较，2013—2014 年度随灌水时间的推迟，产量有逐渐增加的趋势，以 I9.25 与 I9.30 产量最高或较高；2014—2015 年度以 I9.15 最高，2 年均以 CK 处理产量最低。不同镇压重力比较，以 G95 与 G120 产量较高，以 G0 产量较低。年际间比较，以 CK 产量差异最大，2014 年 CK 产量显著低于 2015 年。与 2014 年秋季小麦造墒差，小麦基本苗少，冬前总茎数低，成穗数不足有关。

两个年度小麦产量和产量构成因素的方差分析表明(表 6)，造墒对产量和产量构成因素的影响均达到显著水平。2013—2014 年镇压对穗数影响显著；2014—2015 年镇压对穗数、穗粒数、千粒重影响显著。2013—2014 年造墒和镇压对穗数、穗粒数和千粒重的交互作用显著；而 2014—2015 年造墒和镇压仅对穗粒数和千粒重的交互作用显著。造墒和镇压对产量的交互作用不显著，镇压对产量的主效也不显著。

由表 7 可见，小麦产量与播前土壤含水量正相关，其中产量与 0~10 cm 土壤水分显著正相关，与 10~20 cm 土壤水分极显著正相关(2014 年)，与其他土层相关不显著。产量与同一造墒不同镇压处理条件下土壤硬度相关性年际间差异较大。2014 年正相关，其中 I9.25 处理达到显著水平；2015 年负相关，其中 CK 极

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:201711.01161v1

表 6　不同造墒时期和不同镇压处理对小麦产量和产量构成因素的主效应与方差分析
Table 6　Main effects and *F* values of pre-sowing irrigation and soil compaction on yield and yield components

| 分析 Analysis | 因素 Factor | 处理 Treatment | 2013—2014 年 Year 2013–2014 | | | | 2014—2015 年 Year 2014–2015 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 穗数 Spike number ($10^4$·hm$^{-2}$) | 穗粒数 Grain number per spike | 千粒重 1000-grain weight (g) | 产量 Grain yield (kg·hm$^{-2}$) | 穗数 Spike number ($10^4$·hm$^{-2}$) | 穗粒数 Grain number per spike | 千粒重 1000-grain weight (g) | 产量 Grain yield (kg·hm$^{-2}$) |
| 主效应 Main effect | 造墒时期(I) Irrigation time | CK | 391.6±40.2d | 37.4±3.4a | 47.5±3.2a | 4 588.5±107.6c | 320.7±67.3c | 38.2±3.9a | 37.0±2.6b | 1 755.0±100.6c |
| | | I9.15 | 649.0±50.3c | 33.6±3.2a | 42.9±2.1b | 7 594.7±100.3b | 669.1±58.1ab | 35.8±2.0a | 39.9±1.8a | 8 902.7±98.5a |
| | | I9.20 | 660.2±56.9bc | 33.2±3.1a | 42.5±2.7b | 7 852.0±54.2ab | 666.7±40.2b | 34.0±1.8a | 37.0±2.0b | 7 897.0±83.7b |
| | | I9.25 | 683.1±51.7b | 35.2±2.5a | 41.5±2.3c | 8 012.6±88.7ab | 690.6±43.7a | 31.6±2.4a | 38.9±1.9a | 7 734.3±70.6b |
| | | I9.30 | 743.0±63.2a | 35.6±3.0a | 43.2±2.9b | 8 560.0±98.6a | 672.1±40.0ab | 32.7±3.0a | 39.8±2.2a | 7 933.8±100.3b |
| | 镇压(G) Compaction | G0 | 619.7±73.3b | 34.4±4.0a | 43.5±5.0a | 7 249.0±114.5a | 596.9±90.2b | 36.1±4.1a | 38.7±4.5a | 6 850.9±186.9a |
| | | G95 | 625.4±52.8ab | 34.8±2.9a | 43.5±2.1a | 7 321.6±79.2a | 603.8±65.3ab | 35.5±3.7ab | 38.5±2.7a | 6 844.6±88.3a |
| | | G120 | 631.1±58.1a | 35.8±3.3a | 43.6±3.0a | 7 394.1±83.1a | 608.8±78.2a | 31.7±2.3b | 38.7±2.6a | 6 838.3±98.2a |
| 方差分析 *F* value | | I | 62.65* | 0.95* | 19.22* | 5.47* | 83.59* | 2.46* | 16.74* | 7.55* |
| | | G | 3.16* | 0.54 | 0.12 | 0.29 | 3.61* | 4.07* | 2.43* | 0 |
| | | I×G | 4.54* | 2.12* | 2.71* | 0.02 | 0.47 | 1.04* | 1.78* | 0.02 |

表 7　小麦产量与播前 0~60 cm 不同土层土壤含水量及不同造墒时期和不同镇压处理下土壤硬度的相关性
Table 7　Correlation coefficients between grain yield and pre-sowing soil moisture and soil hardness

| 年份 Year | 含水量 Soil moisture of different soil layer | | | | | | 土壤硬度 Soil hardness | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | 镇压处理 Compaction treatment | | | | | 造墒时间 Irrigation time | | |
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | CK | I9.15 | I9.20 | I9.25 | I9.30 | G0 | G95 | G120 |
| 2014 | 0.921* | 0.984** | 0.807 | 0.861 | 0.854 | 0.817 | 0.982 | 0.989 | 0.970 | 0.999* | 0.986 | 0.913* | 0.864 | 0.421 |
| 2015 | 0.927* | 0.873 | 0.768 | 0.748 | 0.579 | 0.562 | −1.000** | −0.996 | −0.974 | −0.990 | −0.985 | 0.882 | 0.721 | 0.804 |

*与**表示差异达 0.05 显著水平和 0.01 极显著水平。* and ** mean significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

显著负相关。产量与同一镇压不同造墒处理条件下土壤硬度表现正相关性，但年际间处理间变化不具规律性。

## 3　讨论与结论

### 3.1　造墒和播后镇压对土壤耗水特性的影响

本研究条件下，冬前阶段麦田蒸散量为 19.78~51.76 mm，与李梦哲等[6](10.6~47.9 mm)结果相似。本研究 2 年 I9.15、I9.20、I9.25、I9.30 等处理播前 0~100 cm 土壤含水量分别比 CK 平均高 19.55%、26.38%、31.58%和 48.16%。从农田蒸散量来看，2013 年 I9.15、I9.20、I9.25、I9.30 等处理分别比 CK 高 74.07%、56.10%、38.84%和 76.90%，2014 年则高 45.63%、87.73%、96.61%和 119.56%。可见，随农田水分含量增高，其蒸散量有增大的趋势[13]。因此，从水分消耗的角度，土壤水分含量越低，蒸散量越少[13]。但结合生产实际，I9.20 和 I9.25 处理，既能满足小麦出苗对水分的需求，又能适度降低麦田冬前阶段蒸散量(特别是 2014 年 I9.20 和 I9.25 处理农田蒸散量比 I9.15 处理还要低)，是比较适宜的造墒时期。

镇压处理冬前阶段土壤耗水差异较小，从农田蒸散量来看以不镇压的 G0 最高。2013 年 G120、G95 等镇压处理分别比不镇压 G0 减少蒸散量 16.01%和 8.63%，2014 年则为 10.56%和 4.16%。从数值上可以看出，镇压保墒明显，有助于提高土壤含水量[14]。结合本研究冬前小麦群个体性状和表层土壤硬度，发现镇压具有踏实土壤和蹲苗促壮的功能。联系到张迪等[1]结果，在雨雪天气镇压处理地温显著高于不镇压处理。综上可见，播后镇压具有很好的节水增产效果[15]。

另外，从土壤供水变化来看，同一造墒水处理，I9.30 以 G95 土壤供水最低，其他处理均以 G120 土壤供水最低。充分说明墒情较好的麦田，使用较轻的镇压器进行镇压效果好；墒情差的麦田，使用较重的镇压器镇压效果好[1,10]。

### 3.2　造墒与播后镇压对小麦生长发育和产量的影响

本研究 2 年 I9.15、I9.20、I9.25、I9.30 等不同造墒处理小麦生物量分别比 CK 高 11.48%、14.48%、21.04%和 44.26%，次生根条数高 6.24%、12.07%、13.84%和 13.10%，叶面积高 17.56%、22.98%、25.26%和 27.39%。在本研究条件下，墒情条件越好麦田苗质量越高[16]。与造墒处理相比镇压对幼苗的影响较小，且镇压处理对小麦冬前幼苗的影响与水

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:201711.01161v1

分也不同。从幼苗质量来看，同一水分条件下不镇压的处理受影响程度，以叶面积最大，次生根次之，生物量最小[17]。

本研究冬前群体总茎数不同处理间有一定差异。从 2 年结果看，与 CK 相比冬前群体总茎数均以造墒水处理较高。CK 年际间差异较大，2014 年群体总茎数明显低于 2013 年，主要与 2014 年玉米灌浆后期降雨偏少墒情较差有关[11]。2014 年 CK 处理，由于底墒不足出苗差，后期补水也未能减少产量损失。说明提高播种质量的重要性，更说明适宜群体是小麦丰产稳产的关键[18]。该地区年际间降雨时空差异较大[5]，从本研究结果看，CK 处理群体总茎数与降雨年型依附性较强，不利于小麦稳产[4–5]。结合产量与播后镇压土壤硬度相关性不具规律性，但与耕层土壤水分含量显著正相关的结论，可以认为，墒情适宜是小麦播后镇压的基础，镇压又是提墒壮苗的保障[1,14–15]。考虑到土壤硬度与墒情、土质及镇压强度等多因素有关，因此确定产量与镇压的相关关系，还需要在精确控制干扰因素的条件下做更深入的研究。

结合小麦玉米一体化生产，小麦造墒水提前到 9 月 20—25 日，既可满足上茬玉米灌浆对水分的需求，又为小麦储备了造墒水，起到了增墒蓄水、促产增收的作用[19]。本研究条件下，小麦播种后推荐 95 $kg\cdot m^{-1}$ 重量进行镇压，墒情较好的麦田，可适度减少镇压重量，墒情较差的麦田，可适度增加镇压器重量。

## 参考文献 References


[1] 张迪，王红光，马伯威，等. 播后镇压和冬前灌溉对土壤条件和冬小麦生育特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(6): 787–794
Zhang D, Wang H G, Ma B W, et al. Effects of post-sowing soil compaction and pre-winter irrigation on soil conditions and growth and development of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(6): 787–794

[2] 周小萍，陈百明，张添丁. 中国“藏粮于地”粮食生产能力评估[J]. 经济地理, 2008, 28(3): 475–478
Zhou X P, Chen B M, Zhang T D. Evaluating grain productive capacity of China for “storing food in land”[J]. Economic Geography, 2008, 28(3): 475–478

[3] 赵晶晶，刘良云，徐自为，等. 华北平原冬小麦总初级生产力的遥感监测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 346–351
Zhao J J, Liu L Y, Xu Z W, et al. Monitoring winter wheat GPP in Huabei Plain using remote sensing and flux tower[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(S1): 346–351

[4] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. Irrigation Science, 2008, 27(1): 1–10

[5] 陈素英，张喜英，邵立威，等. 华北平原旱地不同熟制作物产量、效益和水分利用比较[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 535–543
Chen S Y, Zhang X Y, Shao L W, et al. A comparative study of yield, cost-benefit and water use efficiency between monoculture of spring maize and double crops of wheat-maize under rain-fed condition in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 535–543

[6] 李梦哲，张维宏，张永升，等. 不同水分管理下全田土下微膜覆盖的冬小麦耗水特性[J]. 中国农业科学, 2013, 46(23): 4893–4904
Li M Z, Zhang W H, Zhang Y S, et al. Water consumption characteristics of winter wheat with soil-coated ultrathin plastic-film mulching under different water managements[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(23): 4893–4904

[7] 周丽丽，梁效贵，高震，等. 基于 CERES-Wheat 模型的沧州地区冬小麦需水量分析[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1320–1328
Zhou L L, Liang X G, Gao Z, et al. Analysis of water demand for winter wheat production in Cangzhou area using CERES-Wheat model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(10): 1320–1328

[8] 党红凯，曹彩云，郑春莲，等. 小麦提前造墒灌水对玉米后期光合与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 127–135
Dang H K, Cao C Y, Zheng C L, et al. Effect of pre-sowing irrigation advancement of winter wheat on photosynthesis and yield of summer maize at later growth stage[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(10): 127–135

[9] 付雪丽，张惠，贾继增，等. 冬小麦–夏玉米“双晚”种植模式的产量形成及资源效率研究[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1708–1714
Fu X L, Zhang H, Jia J Z, et al. Yield performance and resources use efficiency of winter wheat and summer maize in double late-cropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(9): 1708–1714

[10] 亢秀丽，靖华，马爱平，等. 小麦播种过程板结疏松装置的研制与应用[J]. 中国农学通报, 2015, 31(36): 31–34
Kang X L, Jing H, Ma A P, et al. Research and application of the loosen device applied in soil hardening of wheat sowing process[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(36): 31–34

[11] Feng D, Zhang J P, Cao C Y, et al. Soil salt accumulation and crop yield under long-term irrigation with saline water[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2015, 141(12): 04015025

[12] 党红凯，郑春莲，马俊永，等. 冬季抗旱措施对小麦耗水特征与生育性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1127–1134
Dang H K, Zheng C L, Ma J Y, et al. Effects of winter drought resistant strategies on wheat water consumption and growth characteristics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(9): 1127–1134

[13] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North

ChinaXiv合作期刊

China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 211–218

[14] 刘秀位, 苗文芳, 王艳哲, 等. 冬前不同管理措施对土壤温度和冬小麦早期生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1135–1141
Liu X W, Miao W F, Wang Y Z, et al. Effects of different pre-winter management practices on soil temperature and winter wheat seedling growth[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(9): 1135–1141

[15] 张胜爱, 郝秀钗, 崔爱珍, 等. 不同播种措施对河北冬小麦产量影响研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(15): 98–102
Zhang S A, Hao X C, Cui A Z, et al. Effects of different sowing practices on the yield of winter wheat in Hebei Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(15): 98–102

[16] 张立勤, 马忠明, 杨君林, 等. 储水灌溉及覆膜对土壤水分及小麦出苗的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 103–106
Zhang L Q, Ma Z M, Yang J L, et al. Effects of storage irrigation quota and plastic film mulching time on soil water content and spring wheat emergence[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(3): 103–106

[17] 李志洪, 王淑华. 土壤容重对土壤物理性状和小麦生长的影响[J]. 土壤通报, 2000, 31(2): 55–57
Li Z H, Wang S H. Effects of soil bulk density on soil physical properties and wheat growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2000, 31(2): 55–57

[18] Wang J, Wang E L, Yang X G, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. Climatic Change, 2012, 113(3/4): 825–840

[19] 党红凯, 李伟, 曹彩云, 等. 乳熟后灌溉对夏玉米水分利用效率及干物质转运的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 131–138
Dang H K, Li W, Cao C Y, et al. Effects of late milk irrigation on water use efficiency and dry matter distribution of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 131–138

chinaXiv:201711.01161v1